

51

Int. Cl.:

G 03 b, 35/00

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENTAMT



52

Deutsche Kl.:

42 h, 38

1
38 5
5-5

10

11

21

22

43

Offenlegungsschrift 1957 475

Aktenzeichen: P 19 57 475.5

Anmeldetag: 15. November 1969

Offenlegungstag: 11. Juni 1970

Ausstellungspriorität: —

31

Unionspriorität

32

Datum: 25. November 1968

33

Land: V. St. v. Amerika

31

Aktenzeichen: U.S. 778525 Attached

54

Bezeichnung: Verfahren zur Erzeugung eines Phasenobjektes

61

Zusatz zu: —

62

Ausscheidung aus: —

71

Anmelder: International Business Machines Corp., Armonk, N. Y. (V. St. A.)

Vertreter: Preisher, Dipl.-Phys. Hellmut, Patentanwalt, 7030 Böblingen

72

Als Erfinder benannt: Hirsch, Peter Max; Jordan jun., James Adam; Lesem, Louis Bernard; Houston, Tex. (V. St. A.)

Benachrichtigung gemäß Art. 7 § 1 Abs. 2 Nr. 1 d. Ges. v. 4. 9. 1967 (BGBl. I S. 960): —

DT 1957475

BEST AVAILABLE COPY

5.70 009 824/1419

18/70

8

1957475

IBM Deutschland *Internationale Büro-Maschinen Gesellschaft mbH*

Böblingen, den 11. November 1969
pr-sk

Anmelderin: International Business Machines
Corporation, Armonk, N.Y. 10504

Amtl. Aktenzeichen: Neuanmeldung

Aktenz.d. Anmelderin: Docket AT 968 001

Verfahren zur Erzeugung eines Phasenobjekts

Auf vielen Gebieten der Forschung und der Technik genügen die mit den Verfahren der konventionellen Fotografie herstellbaren zweidimensionalen Abbildungen nicht, da sie einerseits zu wenig Information enthalten und andererseits eine Beschädigung schon kleinster Teile des Aufzeichnungsträgers zu unter Umständen untragbaren Informationsverlusten führen kann.

Die seit rund 20 Jahren bekannten Hologramme weisen diese Nachteile zwar nicht auf, liefern aber keine sehr klaren Abbildungen, da der Abbildungsstrahl in mehrere Ordnungen gebeugt wird, so dass unter anderen jeweils eine virtuelle

009824/1419

und eine reelle Abbildung erzeugt wird. Wegen der genannten beiden Abbildungen und der auftretenden höheren Ordnung^{en} ist die Errechnung der die bekannten Hologramme darstellenden Interferenzmuster sehr aufwendig und zeitraubend. Darüber hinaus ist die Lichtausbeute der bekannten Hologramme sehr schlecht, so daß zur Erzeugung sehr heller Abbildungen Lichtquellen sehr hoher Leistung erforderlich sind.

Abgesehen von der Schwierigkeit, die erforderlichen Strahlungsintensitäten zur Verfügung zu stellen, besteht in vielen Fällen die Gefahr, daß die Hologramme durch die auftretende Erwärmung zerstört werden.

Die Erfindung geht von der Aufgabenstellung aus, ein Verfahren zur Herstellung von eine dreidimensionale Abbildung ermöglichenden Anordnungen anzugeben, das einfacher ist und wesentlich weniger Zeit, insbesondere Rechenzeit, erfordert als die bisher bekannten Verfahren. Darüber hinaus sollen die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten abbildenden Anordnungen einen guten Wirkungsgrad, d.h. eine gute Lichtausbeute haben und rauscharme Abbildungen hoher Güte und Helligkeit liefern.

Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung durch ein Verfahren zur Erzeugung eines Phasenobjektes gelöst, das gekennzeichnet ist durch folgende Schritte: a) Feststellung und Aufzeichnung der Amplituden der einzelnen Punkte der gewünschten Abbildung, b) Transformation der Amplitudenverteilungsfunktion in eine

009824/1419

Phasenverteilungsfunktion unter der Annahme einer konstanten Amplitudenverteilung und einer Zufallsphasenverteilung und Aufzeichnung der sich ergebenden Phasenverteilungsfunktion in Form von Grauwerten, c) Umwandlung dieser Grauwertverteilungsfunktion in eine örtlich unterschiedliche Phasenverzögerungen bewirkende Dicken- und/oder Brechungsindex-Verteilungsfunktion, beispielsweise durch Belichten und Bleichen einer lichtempfindlichen Schicht.

Eine besonders vorteilhafte Weiterbildung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist gekennzeichnet durch folgende Schritte:

- a) Festlegung der Strahlungsamplituden $T_R(a,b)$ in den einzelnen Punkten der Abbildung, b) Multiplikation der gewünschten Strahlungsamplitude T_R mit einem Zufallsphasenfaktor $\exp[i\phi(a,b)]$, so dass sich ergibt $T = T_R \exp[i\phi]$, c) Berechnung der Fortpflanzung in Rückwärtsrichtung der komplexen Wellenamplitude T von der Bildebene zum besagten Objekt mit Hilfe einer Fresnel-Transformation $T^* F = |h| \exp[i\phi(x,y)]$, d) Aufzeichnung der Phasenverteilung in Form von Grauwerten, e) Belichtung einer lichtempfindlichen Emulsion mit der Aufzeichnung (evtl. Verkleinerung dieser Aufzeichnung), f) Bleichen der belichteten Emulsion, so daß eine den Grauwerten entsprechende Schrumpfung eintritt.

Eine weitere vorteilhafte Ausbildung des Erfindungsgedankens ist gekennzeichnet durch eine derartige Führung des Bleichvorganges, daß der Phasenunterschied zwischen auf einen Bereich mit $\phi = 0$ und auf einen Bereich mit $\phi = 2\pi$

fallenden Strahlen gleich einer Wellenlänge ist.

Eine andere besonders vorteilhafte Ausbildung des Erfindungsgedankens ist dadurch gekennzeichnet, daß die Bemessung der Dickenstruktur des Phasenobjektes unter Berücksichtigung der Wellenlänge einer im sichtbaren Bereich liegenden kohärenten Strahlung erfolgt.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, daß die Bemessung der Dickenstruktur des Phasenobjektes unter Berücksichtigung der Wellenlänge einer Ultraschallwelle erfolgt.

In gleicher Weise ist es möglich, die Bemessung der Dickenstruktur des Phasenobjektes unter Berücksichtigung der Wellenlänge einer im Mikrowellenbereich liegenden Strahlung durchzuführen. Die Dicken- und Brechungsindexstruktur des Phasenobjektes kann für eine Abbildung mit durchtretender Strahlung durchgeführt werden, bei der sich die Abbildung und ^{die} Lichtquelle an gegenüberliegenden Seiten des Phasenobjektes befinden.

Es ist selbstverständlich aber auch möglich, das Phasenobjekt für einen zweimaligen Durchtritt der Strahlung oder für eine Reflexion an der der Lichtquelle zugewandten Fläche des Objektes auszuliegen.

Eine besonders vorteilhafte Weiterbildung des Erfindungsgedankens ist dadurch gekennzeichnet, daß der Zufalls-Phasenfaktor durch eine Vielzahl diskreter punktförmiger Aperturen angenähert wird, von denen jeweils eine Welle ausgeht.

Eine weitere vorteilhafte Ausbildungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, daß die punktförmigen Aperturen dreidimensional angeordnet sind und einen Wert von 0 (entsprechend keiner Lichtübertragung) bis 1 (volle Lichtübertragung bzw. offene Apertur) haben können.

Die Erfindung wird anhand der Figuren näher erläutert.

Es zeigen:

Fig.1 eine Anordnung zur Wiedergabe eines Kinoforms;

Fig.2A die Darstellung der Verhältnisse bei der Erzeugung eines Gabor-Hologramms;

Fig.2B die Darstellung der Verhältnisse bei der Wiedergabe eines Gabor-Hologramms und die Lage der reellen und virtuellen Abbildungen;

- Fig.3 die Darstellung eines ebenen Gitters und einer Linse, durch die die vom Gitter einfallenden Strahlen in verschiedenen Ordnungen fokussiert werden;
- Fig.4A einen Ausschnitt aus der in Fig.3 dargestellten Anordnung;
- Fig.4B die Darstellung eines Verfahrens zur Wiedergabe von direkten oder Geradeaus-Gabor-Hologrammen, bei der eine Phasenänderung durch verschiedene Glasdicken erzeugt wird;
- Fig.5 die Aufspaltung des an einem durch die Interferenz von zwei aus verschiedenen Richtungen einfallenden Lichtstrahlen erzeugten Hologramms gebeugten Wiedergabestrahls in verschiedene Ordnungen;
- Fig.6 die Darstellung der Phasenverzögerung zur Erzeugung einer Abbildung bei einem erfindungsgemäßen Kinoform;
- Fig.7 ein Blockdiagramm zur Veranschaulichung des Verfahrens zur Herstellung des erfindungsgemäßen Kinoforms.

In Fig.1 wird in allgemeiner Form ein Verfahren zur Erzeugung einer Abbildung wiedergegeben. Durch die Beleuchtung des Objektes 3, das im folgenden als Kinoform bezeichnet wird, wird eine Abbildung erzeugt. Die beispielsweise als Laser ausgebildete Lichtquelle 1 erzeugt einen Zug sphärischer Wellen 2, die auf das Kinoform 3 auffallen. Die Wellen 2 werden dabei in vorgegebener Weise verzögert, so daß ihre Phasenlage verändert und durch die eintretenden Interferenzen eine Abbildung 4 erzeugt wird.

Zur Veranschaulichung der Vorgänge bei der Erzeugung einer Abbildung durch ein Kinoform sei angenommen, daß zwei Wellen auf einen Glaskörper auffallen, der aus zwei unterschiedliche Dicken aufweisenden Teilen besteht. Die auf den dickeren Teil des Glaskörpers auffallende Welle wird stärker verzögert, als die Welle, die auf den dünneren Teil des Glaskörpers auftrifft, da die Lichtgeschwindigkeit im Glas kleiner ist als in Luft. Die aus dem dickeren Teil des Glaskörpers austretende Welle wird daher in bezug auf die aus dem dünneren Teil des Glaskörpers austretende Welle verzögert sein. Diese Verzögerung der einen Welle in bezug auf die andere erzeugt im weiteren Verlauf der Strahlung ausserhalb des Glases ein Interferenzmuster. Unter Kinoform wird ein Objekt verstanden, das aus einer Vielzahl derartiger Teile besteht, so daß ein Phasenobjekt zur beliebigen Phasenverzögerung einer Strahlung entsteht.

In Fig.2A wird ein bekanntes holographisches Verfahren wiedergegeben. Von der Lichtquelle 6 geht eine Referenzstrahlung aus, die aus den vom Objekt 7 unbeeinflussten ebenen Wellen besteht. Ist der Abstand zwischen dem Objekt 7 und dem Hologramm 8 gleich L, so ist die Weglängendifferenz zwischen den ungebeugten Referenzwellen und den Objektwellen gleich der Länge des vom Objekt auf das Hologramm gefällten Lotes abzüglich der Länge eines Strahles zum Punkt X des Objektes. Daher ist die Weglängendifferenz $\Delta P = L - (x^2 + L^2)^{1/2}$. Wie aus Fig.2B ersichtlich, bildet der um das Objekt herum zum Hologramm gelangende und vom Objekt nicht beeinflusste Strahlungsteil die Referenzwelle, die mit dem vom Objekt beeinflussten Strahlungsanteil ein Interferenzmuster bildet. Jeder Punkt dieses Objektes erzeugt ein aus konzentrischen Ringen bestehendes Interferenzmuster, das einer Fresnelzonenplatte ähnlich ist und wie eine kleine Linse wirkt, durch die der Wiedergabestrahle auf einen Bildpunkt fokussiert wird. Aus Fig.2B ist ersichtlich, daß die von der Lichtquelle 9 ausgehende Wiedergabestahlung 10 durch das Hologramm 8 in einem Punkt vor dem Hologramm fokussiert wird, wo die reelle Abbildung 11 steht. Die von einem scheinbaren, hinter dem Hologramm gelegenen Punkt ausgehende Strahlung bildet die virtuelle Abbildung 12. Wie aus der Figur ersichtlich, liegt die reelle und die virtuelle Abbildung auf einer Achse, wodurch unter gleichzeitiger Berücksichtigung des ungebeugten Lichtes die Qualität einer mit Hilfe eines

Geradeaus-Hologramms erzeugten Abbildung stark herabgesetzt wird.

Eine mathematische Analyse des Verfahrens zur Herstellung eines "Geradeaus-Hologramms" kann dadurch gemacht werden, daß man von einem durch eine kohärente Lichtquelle beleuchteten Transmissionsobjekt ausgeht. Das Beugungsmuster wird auf einer fotografischen Platte oder auf einem Film in der Ebene des Hologramms aufgezeichnet. Das Objekt wird zweckmäßigerweise durch die Übertragungsfunktion $T(a,b) = T_B + T_r(a,b)$ beschrieben, wobei T_B die allgemeine Durchlässigkeit des Objektes und $T_r(a,b)$ die Abweichung vom Durchschnitt in (a,b) auf der Objektebene ist. Wenn eine kohärente Welle mit Einheitsamplitude auf das Objekt auffällt, so wird die Wellenfront in der Hologrammebene definiert durch:

$$h(x,y) = \int T(a,b) F(x-a,y-b) da db ,$$

wobei F eine geeignete, komplexe Werte umfassende Funktion ist, die die Fortpflanzung der Welle von Punkt (a,b) auf der Objektebene zu dem Punkt (x,y) auf der Hologrammebene beschreibt. Der Term $h(x,y)$ kann auch in gefalteter Schreibweise wiedergegeben werden:

$$h(x,y) = T * F(x,y).$$

Diese aus komplexen Werten bestehende Funktion $h(x,y)$ beschreibt die am Objekt gebeugte Wellenfront, die ein Beobachter sehen würde, der von der Hologrammebene zum Objekt blickt. Es sei ferner darauf hingewiesen, daß die Wellenfront eine aus komplexen Werten bestehende Funktion ist und daher durch eine Amplitude und eine Phase beschrieben werden kann:

$$h(x,y) = C(x,y) \exp [i \phi(x,y)] .$$

Zur vollständigen Beschreibung der Wellenfront muß sowohl die Amplitude C als auch die Phase ϕ aufgezeichnet werden. Die bekannten Detektoren für elektromagnetische Wellen im Bereich optischer Frequenzen sprechen nicht auf die Phasenlage, sondern nur auf die Intensität einer Welle, d.h. $I = |h|^2 = C^2$ an. Diese Detektoren werden daher als Quadratwertdetektoren (square law detectors) oder kurz quadratische Detektoren bezeichnet.

Bei Verwendung der Darstellung in Faltform folgt, daß die Schwärzung der lichtempfindlichen Schicht des Films eine Funktion ist von:

$$H(x,y) = |h|^2 = |T_b * F|^2 + T_b(T_r * F) + T_b(\overline{T_r * F}) + |T_r * F|^2$$

wobei die \bar{X} die komplexe Konjugierte von X bedeutet.

Wird das Hologramm durch eine zweite kohärente Welle beleuchtet, die die gleiche Form wie die erste hat, so ist die sich ergebende Wellenform das Äquivalent einer Faltung von $H(x,y)$ mit $F(x,y)$, was ergibt:

$$P(u,v) = \left| T_b * F \right|^2 * F + T_b (T_r * F) * F + T_b \overline{(T_r * F)} * F + \left| T_r * F \right|^2 * F$$

Der dritte Term dieses Ausdruckes kann auf $T_b T_r$ reduziert werden, woraus ersichtlich ist, daß die Rekonstruktion der Information, die einen Teil von $T(a,b)$ enthält, durchgeführt werden kann. Die anderen Terme dieses Ausdrucks tragen lediglich zur unerwünschten Verschlechterung der Abbildung bei.

Zur Vermeidung der durch die Verschlechterung der Abbildung entstehenden Probleme wurden die holographischen Verfahren verbessert, bei denen eine von der Beleuchtungswelle getrennte,

schräg zur Achse einfallende Bezugswelle benutzt wird. Die Analyse dieser holographischen Verfahren wird anhand der Figur 3 erläutert, in der ebene Wellen 13 auf ein in waagrechter Richtung verlaufendes Gitter 32 fallen. Dieses Gitter besteht aus hellen und dunklen Bereichen gleicher Breite. Die in an sich bekannter Weise am Gitter gebeugten Wellen werden mittels der Linse 14 abgebildet, und zwar in Form einer mittleren oder nullten Ordnung, der positiven ersten und zweiten Ordnungen und der negativen ersten und zweiten Ordnungen. Weitere auftretende Ordnungen wurden der Einfachheit halber nicht dargestellt. Die durch die Linse 14 übertragene Amplitude ändert sich gemäß des Ausdruckes $A_t = a + b \cos 2 \pi dy$, wobei A_t die übertragene Amplitude, y die vertikale Koordinate in der Ebene des Gitters und $1/d$ die Gitterkonstante ist. a und b sind Konstanten, die die mittlere Übertragung und den Kontrast des Gitters angeben. Ist b kleiner als a , so wird durch das Gitter Licht der Amplitude " a " in der nullten Ordnung übertragen, während auf beiden Seiten im Bereich der ersten Ordnung Licht mit der Amplitude $1/2 b$ vorliegen wird. Daraus ergibt sich, daß die Amplitude des in beiden ersten Ordnungen gebeugten Lichtes proportional b ist. Dabei tritt ein beträchtlicher Anteil des einfallenden Lichtes in der nullten Ordnung auf, während Licht gleicher Intensitäten in beiden ersten Ordnungen vorliegt.

In Fig. 4A sind die in Fig. 3 wiedergegebenen Verhältnisse in größerer Ausführlichkeit dargestellt. Aus dem Gitter 5 tritt

AT 963 001

002824/1112

Licht unter verschiedenen Winkeln aus und eine konstruktive Interferenz tritt immer dann auf, wenn der Abstand d zwischen dem Gitter 15 um der Länge d um eine Wellenlänge oder um ein ganzzahliges Vielfaches einer Wellenlänge länger als der direkte Abstand d ist. Eine Untersuchung zeigt, daß die Gittergleichung:

$$N \lambda = d \sin \theta$$

sich aus dieser Weglängendifferenz ergibt. N ist die Ordnung des erzeugten Bildes; λ ist die Wellenlänge des Lichts; θ ist der Winkel unter dem das Licht gebeugt wird und d der Abstand zwischen den Gitterlinien. Die räumliche Frequenz des Gitters oder die Anzahl der Gitterlinien je cm ist gleich $1/d$.

In Fig. 4B wird eine andere Art von ebenen Gittern dargestellt. Das mit 17 bezeichnete Gitter besteht aus einem dicken Bereich 18 und einem dünneren Bereich 19. Der Brechungsindex des Materials ist vom Brechungsindex der Luft verschieden, so daß eine Verzögerung der den Bereich 18 durchsetzenden Wellen in bezug auf die den Bereich 19 durchsetzenden Wellen eintritt. Die auf den Körper 17 auftreffenden Wellen 20 haben eine feste Phasenbeziehung, was auch bei den die beiden Bereiche 18 und 19 dieses Körpers verlassenden Wellen der Fall ist. Um eine Phasendifferenz von 180° zu erhalten, muß die Dicke der Bereiche 18 und 19 gleich sein $T = \lambda/2(n_1 - n_2)$, wobei

009824/1419

n_1 der Brechungsindex des Gittermaterials und n_2 der Brechungsindex von Luft ist. Als Ergebnis der Verzögerung um eine halbe Phase der Welle wird die Strahlung, wie im Zusammenhang mit den Fig. 5 und 4A beschrieben, gebeugt. Bei der in Fig. 4B beschriebenen Anordnung werden die Strahlen 20 jedoch nicht wie bei den konventionellen Gittern unterbrochen oder gestreut. Es wurde auf empirischem Wege festgestellt, daß die Intensität des aus einem Gitter gemäß Fig. 4B austretenden Lichtes viermal so groß ist, wie die Intensität des aus konventionellen Gittern austretenden Lichtes.

Hologramme mit einer von der Beleuchtungswelle getrennten, schräg zur Achse einfallenden Bezugswelle können als eine Überlagerung von ebenen Gittern aufgefasst werden, bei der die Gitterlinien im Bereich einer bestimmten zentralen Frequenz Häufungsstellen aufweisen. Wird die zentrale Frequenz beispielsweise durch $1/D_0$ definiert, so wird die Beugung im wesentlichen in den Bereichen stattfinden, in denen $N \lambda = D_0 \sin \theta$ ist.

Aus Fig. 5 ist die Beugung ersichtlich, die bei Beleuchtung eines Hologramms mit ebenen Wellen auftritt. Ein Teil der auf das Hologramm 22 auffallenden ebenen Wellen 21 durchsetzen das Hologramm ungebeugt als mittlere Ordnung. Da jedoch bei der Rekonstruktion jeder kleinste Bereich des Hologramms als ein Gitter wirkt, wird, wie aus dem oben Gesagten hervorgeht, ein Teil des Lichtes in die ersten realen und virtuellen Ordnungen gebeugt. Wie schon gesagt, wirkt jeder kleinste

Bereich des Hologramms als ein Gitter und bestimmt somit die Amplitude und die Phase des in Richtung der unteren und oberen Strahlen des an diesem Bereich gebeugten Lichtes. Der an einem im Linienbereich gebeugte obere Strahl ist bis auf die Phasenumkehr gleich dem in diesem Bereich gebeugten unteren Strahl. Der gesamte obere Wellenzug der die virtuelle Abbildung erster Ordnung ist eine Kombination bzw. ein Mosaik von an den einzelnen Bereichen gebeugten Wellen und hat somit die gleiche Amplitude und Phasenverteilung wie die ursprüngliche Objektwelle. Ein aus der Richtung des oberen Strahls durch das Hologramm blickender Beobachter sieht eine virtuelle Abbildung des Objekts. Der untere, der reellen Abbildung erster Ordnung zugeordnete Strahl weist die gleiche Amplitudenverteilung wie der obere Strahl erster Ordnung auf, jedoch sind alle Phasenbeziehungen umgekehrt. Die reelle Abbildung wird somit durch den unteren Strahl erzeugt. Aus der Fig. 5 ist zu erkennen, daß die bei der Geradeausholographie auftretenden entstellten Bilder zwar durch die holographischen Verfahren mit schräg zur Achse einfallendem Bezugsstrahl vermieden werden konnten, daß aber auch bei den zuletzt genannten Verfahren, bedingt durch die auftretenden unerwünschten Beugungsordnungen, nur eine relativ schlechte Ausnutzung der Energie des Wiedergabestrahls möglich ist. Es hat sich nämlich gezeigt, daß ein großer Teil der Intensität des Wiedergabestrahls im Bereich der mittleren Ordnung auftritt, und daß die Intensität der Strahlung im Bereich der unerwünschten ersten Ordnung ebenso groß ist wie im Bereich der gewünschten ersten Ordnung. Daraus ergibt sich, daß die

Erstellung von Hologrammen mittels Computer unverhältnismäßig viel Zeit in Anspruch nimmt, da bei den bisher angewendeten Verfahren auch die zur Erzeugung der unerwünschten Ordnungen erforderliche Information berechnet werden muß. Der dadurch bedingte große Aufwand an Rechenzeit hat die Verwendbarkeit derartiger Hologramme stark eingeschränkt.

In Fig. 6 fallen die ebenen Wellen 24 auf das Kinoform 25 und werden dabei in ihrer Phasenlage so beeinflusst, daß eine reelle Abbildung 26 der nullten Ordnung erzeugt wird. Die Verwendung von Kinoformen führt zu einer Reihe von Vorteilen, von denen das Fehlen unerwünschter Ordnungen der wichtigste ist. Das Kinoform ist axial ausgerichtet und die gesamte einfallende Energie der Wellen 24 gelangt zur Abbildung 26. Da nur eine Ordnung erzeugt wird, entfällt bei der Herstellung von Kinoformen mit Hilfe von Computern die für die Berechnung der unerwünschten Ordnungen erforderliche Zeit, so daß die Berechnung eines Kinoforms wesentlich weniger Zeit in Anspruch nimmt als die Berechnung eines konventionellen Hologramms. Es ist noch darauf hinzuweisen, daß Kinoforme, nicht nur wie in Fig. 6 dargestellt, zur Verwendung mit ebenen Wellen, sondern auch zur Verwendung mit Wellen beliebiger Form hergestellt werden können.

Ein Kinoform besteht aus durchsichtigem Material, so daß die gesamte einfallende Energie hindurchtreten kann. Die Form des Materials wird entweder durch Ätzen oder Bleichen in einer gewünschten Weise zur Erzeugung eines Reliefs verändert. Da der

Brechungsindex des Kinoforms vom Brechungsindex der Luft verschieden ist, treten bei den das Kinoform verlassenden Strahlen relative Phasendifferenzen auf. Das Kinoform beeinflusst somit nur die Phase einer Wellenfront. Die von einem bestimmten Objekt ausgehende Wellenfront kann durch den Ausdruck $W = A(X,Y)e^{i\phi(X,Y)}$ beschrieben werden, d.h., die Wellenfront wird durch die Amplitude A und durch die Phase ϕ in jedem Punkt des Raumes definiert. In Übereinstimmung des Rayleigh'schen Theorems kann der mittlere Wert der Amplitude A als konstant betrachtet werden, wenn die Wellenfront von einer großen Anzahl von punktförmigen Quellen ausgeht, die alle die gleiche Wellenlänge jedoch beliebige Phasen aufweisen. Daher kann die Phase ϕ wie in Fig. 6 ausgebildet sein, um eine Wellenfront ohne Berücksichtigung der Amplitude ^{zu} bilden. Diese auf dem Rayleigh'schen Theorem beruhende Annahme einer über die ganze Ebene konstanten Amplitude basiert auf der Ähnlichkeit der optischen Phasen mit einfachen harmonischen Oszillatoren, die gleiche Amplituden jedoch beliebig verteilte Phasen haben. Wird nach dem genannten Theorem von einer Einheitsamplitude ausgegangen, so ist die Intensität der Überlagerung der harmonischen Bewegungen gleich:

$$I = \left(\sum_{n=1}^N e^{i\phi_n} \right) \left(\sum_{m=1}^N e^{-i\phi_m} \right)$$

Die Summe enthält N jeweils der Einheitsgröße gleiche Terme, die eine Aufsummierung der Oszillatoren, so als wären diese

inkohärent darstellt und eine doppelte Summe:

$$\sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^N e^{i(\phi_n - \phi_m)}$$

die die Schwebung jedes Oszillators mit jedem anderen Oszillator darstellt. Bei einer Zufallsverteilung der Strahlen können diese Terme sowohl positiv als auch negativ sein, so daß der Durchschnittswert der gesamten Intensität gleich N ist. Daraus ergibt sich, daß die mittlere Amplitude durch \sqrt{N} definiert ist. Das Rayleigh'sche Theorem enthält eine statistische Aussage. Die oben beschriebenen Überlegungen können auch auf Fälle mit vom Einheitswert abweichenden Amplituden ausgedehnt werden.

Aus dem Theorem ergibt sich, daß eine geeignet wiedergegebene Abbildung erhalten werden kann, wenn eine Welle mit einer dem Einheitswert gleichen Amplitude so beeinflusst wird, daß die Phase der Wellenfront eine gewünschte Form aufweist. Zur Erzeugung der Abbildung ist daher nur ein Phasenobjekt mit konstanter Durchlässigkeit erforderlich. Das einfache Verfahren zur Beeinflussung der Phase ist das in der Brechungsoptik verwandete, bei dem die Differenz der Lichtgeschwindigkeit in einem Medium im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit im anderen Medium verwendet wird. Diese Verhältnisse liegen in der in Fig. 4B wiedergegebenen Anordnung vor. Wie im Zusammenhang mit

der Besprechung dieser Figur beschrieben, weisen die aus den beiden verschieden dicken durchsichtigen Bereichen austretenden Wellen in bezug aufeinander eine Phasenverschiebung auf, die in ihrem weiteren Verlauf ein Interferenzmuster erzeugt.

Ist ein Kinoform zur Phasenverzögerung reliefartig strukturiert, so wird die von einer bestimmten Anzahl von Punkten ausgehende Wellenfront wiedergegeben. Bei der Betrachtung dieser Wellenfront wird ein virtuelles Bild der oben genannten Anzahl von Punkten sichtbar. Ist das Kinoform so ausgebildet, daß die Phasen zur Wiedergabe der konjugierten Wellenfront verzögert werden, so wird eine reelle Abbildung sichtbar.

Es ist selbstverständlich auch möglich, die relativen Phasenverzögerungen nicht durch einen Körper mit gleichem Brechungsindex und unterschiedlichen Dickenabmessungen, sondern durch einen Körper mit gleicher Dickenabmessung und unterschiedlichen Brechungsindizes zu bewirken. Auch eine Kombination beider Maßnahmen ist möglich. Das Verfahren läßt sich nicht nur mit Lichtwellen, sondern auch mit Ultraschall- oder Mikrowellen durchführen.

Fig. 7 enthält ein Blockdiagramm, durch das die Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Herstellung eines Kinoforms wiedergegeben werden. Die gewünschte Bildinformation wird einem Rechner zugeführt, in der die erforderlichen Phasen berechnet werden. Die Eingabe kann beispielsweise mit Hilfe

von Lochkarten erfolgen, in denen die Bildamplituden im Bereich der XYZ-Koordinaten enthalten sind. Die Wellenfront der Abbildung in der Ebene des Kinoforms wird, wie im folgenden noch näher erläutert, berechnet, und die Phase der Wellenfront ermittelt. Die Phase oder ihre Konjugierte wird je nachdem, welche Art von Abbildung gewünscht wird, mit Hilfe einer Zeichenmaschine, die beispielsweise zur Wiedergabe von 32 Grauwerten ausgebildet ist, so wiedergegeben, daß die Phasenwerte im Bereich von 0 bis 2π enthalten sind. Die Zeichnung wird dann photographisch auf eine Größe verkleinert, die zur Beleuchtung mit den zur Verfügung stehenden kohärenten Lichtquellen geeignet ist. Die photographisch verkleinerte Anordnung wird dann gebläht, wobei durch das Bleichen eine Verringerung der Dicke der Anordnung eintritt, die der Schwärzung der einzelnen Bereiche proportional ist.

Die Wellenfront wird wie folgt erzeugt: Die am Objekt gestreute Wellenfront kann in der Ebene des Kinoforms in folgender Weise beschrieben werden:

$$h(x,y,z_0) = \int T(a,b,c) F(x-a, y-b, z_0-c) da db dc$$

wobei das Objekt $T(a,b,c) = T_r(a,b,c) e^{i\psi(a,b,c)}$ durch eine reelle Durchlässigkeit (oder Reflektivität) $T_r(a,b,c)$ und eine Phasenschiebung $\psi(a,b,c)$ beschrieben wird. F ist eine geeignete, komplexe Werte enthaltende Funktion, die die Fortpflanzung des Lichtes vom Punkt (a,b,c) in Objekt zum Punkt (x,y) in der Ebene

des Hologramms beschrieben wird. (F hängt von der Art der verwendeten Beleuchtung ab). Die Funktion $\Psi(a,b,c)$ beschreibt entweder die diffuse Streuung (Phasenveränderungen der Wellenfront am Objekt) an einem dreidimensionalen Objekt oder an der in einer Transmissions-Hologramm-Vorrichtung verwendeten Streuplatte.

Die die diffuse Streuung des Lichts am Objekt beschreibende Funktion $\Psi(a,b,c)$ führt zu erheblichen Schwierigkeiten. Im allgemeinen sind die räumlichen Frequenzen einer gebeugten Welle ohne die Funktion $\Psi(a,b,c)$ niedrig. Die Einführung einer beliebigen Funktion $\Psi(a,b,c)$ führt zu außerordentlich hohen räumlichen Frequenzen, die nur durch die Apertur des Hologramms begrenzt werden. Der zur Berücksichtigung dieser Tatsache erforderliche rechnerische Aufwand übersteigt jedes vertretbare Maß, so daß andere Verfahren entwickelt werden mußten.

Als besonders vorteilhaft hat sich ein Verfahren erwiesen, bei dem das Objekt als eine Vielzahl von einzelnen punktförmigen Aperturen betrachtet wird, wobei aus jeder Apertur eine sphärische Welle austritt und wobei eine beliebige Phasenlage der auf die Aperturen auftreffenden Wellenfronten angenommen wird. Die Kirchhoff'sche Beugungstheorie gibt für eine einzige Dimension und eine einzige Apertur die Fortpflanzung der Wellenfront wie folgt an:

$$h(x, a_j) \approx c \int_{a_j - \delta/2}^{a_j + \delta/2} e^{\frac{i\eta}{\lambda z} (x-a)^2} e^{i\alpha(a)} da$$

für eine Apertur der Länge δ , die um a_j zentriert und sich um den Abstand z fortpflanzt, wobei $z \gg |x-a|$ und wobei $\alpha(a)$ eine beliebige Funktion ist. Mit gegen 0 gehendem δ ist

$$h(x, a_j) \approx c' e^{\frac{i\eta}{\lambda z} (x-a_j)^2} e^{i\alpha(a_j)}$$

Für mehrere punktförmige Aperturen, von denen jede die Durchlässigkeit $T_r(a_j)$ und eine Phasenverschiebung $\alpha(a_j)$ hat, wird $h(x, a_j)$ über a_j summiert, um

$$h(x) = \sum_{j=-m/2}^{m/2-1} T(a_j) h(x, a_j) = c' \sum_{j=-m/2}^{m/2-1} T(a_j) e^{iK(x-a_j)^2}$$

zu erhalten,

$$\text{wobei } K = \frac{\eta}{\lambda z} \text{ und } T(a_j) = T_r(a_j) e^{i\alpha(a_j)}.$$

Durch Umschreiben der obigen Gleichung erhält man

$$h(x) = c' e^{iKx^2} \sum_{j=-m/2}^{m/2-1} T(a_j) e^{iKa_j^2} e^{-2iKa_j x}$$

Die Bewertung dieser Summe in äquidistanten Punkten (so daß $a_j = j \Delta a$ und $x_\ell = \ell \Delta x$) ergibt

$$h(x_\ell) = c' e^{iKx_\ell^2} \sum_{j=-m/2}^{m/2-1} T(a_j) e^{iK(\Delta a)^2 j^2} e^{-2iK\Delta a \Delta x \ell j}$$

wobei $\ell = -m/2, \dots, m/2-1$.

Wird darüberhinaus die Beziehung $\Delta x = \lambda z / \Delta$ am angenommen,
dann ist

$$h(x, \ell) = c' e^{iK(\Delta x)^2} \ell^{m/2-1} \sum_{j=m/2}^{2m/2-1} T(a_j) e^{iK(\Delta a)^2 j^2} e^{-2\pi i \ell j/m}$$

Dieser Ausdruck kann auch so geschrieben werden:

$$h(x, \ell) = c' e^{iK(\Delta x)^2} \ell^{m/2-1} \widehat{TE}(x, \ell)$$

wobei $TE(a_j) = T(a_j) e^{iK(\Delta a)^2 j^2}$ und \widehat{TE} die endliche Fourier Transformation von TE ist. $\widehat{TE}(x, \ell)$ ist eine periodische Funktion von ℓ mit der Periode m und je einem Element für jedes Element der Objektanordnung. Wiederholungen dieser Summe tragen zu einer "Verbreiterung" der Information bei, so daß mit Hilfe dieses Verfahrens hergestellte Kinoforme ebenso redundant wie optische Hologramme gemacht werden können. Eine Vergrößerung der Anzahl der Wiederholungen bedingt, daß $m \cdot \Delta x \ll m \cdot \Delta a$ erwünscht ist, was bedeutet, daß $\Delta x \ll \Delta a$ ist. $m \cdot \Delta x$ sollte kleiner als der Durchmesser der zur Betrachtung des Kinoforms verwendeten Linse sein, so daß unter allen Umständen mindestens eine Periode sichtbar wird. Wird die virtuelle Abbildung beispielsweise mit dem Auge betrachtet, so sollte der Durchmesser der Pupille größer sein als $m \cdot \Delta x$.

Es wird darauf hingewiesen, daß der Term vor der Summe im allgemeinen nicht periodisch ist. Da $h(x)$ eine stetige Funktion ist, muß sie richtig getastet werden, d.h. daß Δx so klein sein muß, daß $h(x_{\ell})$ eine gute Annäherung an $h(x)$ ist.

Für die Berechnung wird die Abbildung als eine dreidimensionale Anordnung von punktförmigen Aperturen betrachtet. Jeder Apertur wird ein Wert zwischen 1 und 0 zugeordnet, wobei der Wert 0 bedeutet, daß kein Licht durch die Apertur durchdringt, während der Wert 1 einer offenen Apertur zugeordnet ist. Die dazwischen liegenden Werte stellen die relativen Durchlässigkeiten der Aperturen dar. In einem Ausführungsbeispiel weist jede Ebene ein Gitter von 64×64 Aperturen auf. Die Anzahl der Ebenen kann beliebig gewählt werden.

Der erste Schritt zur Erstellung des die Zeichenmaschine steuernden Bandes besteht in der Berechnung der endlichen Fourier Transformation der Funktion $TE(a_j)$. Bei dieser Berechnung werden der Anordnung $TE(a_j)$ Nullen zugeordnet, so daß sie zu einem Vektor mit m Elementen wird. Dadurch wird die $h(x)$ Anordnung interpoliert. Auf diese Weise ist

$$\widehat{TE}(\ell/p) = \sum_{j=-m/2}^{m/2-1} T(a_j) e^{iK(\Delta a)^2 j^2} e^{2\pi i(\ell/p)j/m}$$

und in der interpolierten Transformation

$$\hat{TE}(\ell/p) = \sum_{j=-n/2}^{n/2-1} T(a_j) e^{iK(\Delta a)^2 j^2} e^{2\pi i \ell j/n}$$

wobei $n = pn$ und $T(a_j) = 0$ für die Werte von $j = -n/2, -n/2+1, \dots, -m/2-1$ und $j = m/2, m/2+1, \dots, +n/2-1$ ist. ℓ liegt im Bereich zwischen $-n/2$ und $n/2-1$.

Da die Anordnung \hat{TE} die Periode n hat, kann es so oft wie nötig wiederholt werden, um ein Kinoform beliebiger Größe und beliebiger Redundanz zu erzeugen.

Viele der zur Erstellung eines Kinoforms erforderlichen Schritte, sind, wie oben gezeigt, den zur Erzeugung eines digitalen Hologramms erforderlichen Schritten sehr ähnlich. So wird beispielsweise die Annahme von punktförmigen Aperturen, die zur Vereinfachung der Berechnung eines Kinoforms gemacht wird, auch bei der Berechnung eines digitalen Hologramms angewendet werden. Die Aperturen eines besonders einfachen Kinoforms sind so gewählt, daß der Buchstabe B gebildet wird, wobei die Wellenfronten in der oben genannten Weise zu berechnen sind.

Kurz zusammengefaßt, geht die mathematische Beschreibung der Bildung eines Kinoforms folgendermaßen vor sich: Die gewünschte Bildamplitude $T_R(a,b)$ wird bestimmt und ein beliebiger Phasenfaktor $\exp[i\phi(a,b)]$, der eine Mattscheibe simuliert, wird erzeugt und multipliziert mit T_R : $T = T_R \exp[i\phi]$. Die rückwärtige Fortpflanzung der komplexen Wellenamplitude T von der Bildebene zur Hologrammebene wird mit Hilfe der Fresnel Transformation $T * F = |h| \exp[i\phi(x,y)]$ berechnet. Die Phasenverteilung $\phi(x,y)$ wird als Amplitude mit Hilfe einer zur Darstellung von 32 Grauwerten geeigneten Zeichenmaschine aufgezeichnet und die Aufzeichnung photographisch im geeigneten Umfang verkleinert. Die Verkleinerung wird in bekannter Weise unter Verwendung eines dichromatischen Bleichmittels gebleicht, so daß eine komplexe Amplitudendurchlässigkeit $\exp[i\phi(x,y)]$ erzeugt wird.

Es ist besonders hervorzuheben, daß bei der oben angegebenen mathematischen Beschreibung der Erzeugung eines Kinoforms, nur die Phasenverteilung berechnet wird und an keiner Stelle Veränderungen der Amplitude berücksichtigt werden. Dieses Verfahren beruht auf dem Rayleigh'schen Lehrsatz, wonach bei mit beliebiger Phase in eine Ebene einfallenden Lichtstrahlen die Amplitude als konstant angenommen werden kann. Durch die Einführung eines Zufallsphasenfaktors $\exp[i\phi(a,b)]$, durch die eine Mattscheibe oder eine Anordnung punktförmiger Blenden simuliert wird, entfällt die Notwendigkeit, eine Amplitude bei der Berechnung der zu

zeichnenden Wellenform zu berücksichtigen.

Das Bleichen der photographischen Verkleinerung bei der Herstellung eines Kinoforms muß mit viel größerer Sorgfalt durchgeführt werden, als dies bei gebleichten Hologrammen erforderlich ist. Das Relief der Emulsion muß so ausgebildet sein, daß ein auf einen Bereich mit $\phi = 0$ auffallender Lichtstrahl in bezug auf einen auf einen Bereich mit $\phi = 2\pi$ fallenden Lichtstrahl um eine Wellenlänge verzögert wird. Wird eine Phasenanpassung erreicht, so tritt nahezu die ganze auf ein Kinoform auffallende Strahlung in der gewünschten Abbildung auf. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß keine unerwünschten Ordnungen auftreten.

Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein abbildendes Element erzeugt, das alle Vorteile eines konventionellen, mit Hilfe eines Computers hergestelltes Hologramm aufweist. Als besonders wichtig wird dabei die Tatsache angesehen, daß jeder Teilbereich dieses Elements die gesamte Information enthält. Das hat zur Folge, daß im Falle der Anwendung in Festwertspeichern, Kratzer oder Beschädigungen eines Teils des als Kinoformspeicher ausgebildeten Elements nicht zu einem Informationsverlust führen. Die Vorteile des mit dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Kinoforms gegenüber den bekannten, mit Hilfe von Computern hergestellten Hologrammen sind bedeutend. Durch die Annahme punktförmiger Aperturen, durch die

die Anwendung eines Zufallsphasenfaktors und einer konstanten Amplitude ermöglicht wird, kann der rechnerische Aufwand zur Erstellung des Kinoforms stark herabgesetzt werden. Ein weiterer Vorteil wird darin erblickt, daß die bei den bekannten Hologrammen erforderliche Berechnung der unerwünschten Ordnungen wegfällt, so daß eine weitere Herabsetzung der erforderlichen Rechenzeiten entsteht. Da bei einem Kinoform die gesamte eingestrahlte Wiedergabeenergie nur in der gewünschten Ordnung auftritt, ergibt sich die Möglichkeit, sehr helle Bilder mit einer außerordentlich hohen Lichtausbeute zu erzeugen. Durch das Wegfallen unerwünschter Ordnungen und hoher räumlicher Frequenzen werden weitere Vorteile erzielt, die den mit dem erfindungsgemässen Verfahren hergestellten Kinoformen weitere Anwendungsgebiete eröffnen.

Böblingen, 11. November 1969
pr-sk

P a t e n t a n s p r ü c h e

- (1). Verfahren zur Erzeugung eines Phasenobjektes, gekennzeichnet durch folgende Schritte:
- a) Feststellung und Aufzeichnung der Amplituden der einzelnen Punkte der gewünschten Abbildung,
 - b) Transformation der Amplitudenverteilungsfunktion in eine Phasenverteilungsfunktion unter der Annahme einer konstanten Amplitudenverteilung und einer Zufallsphasenverteilung und Aufzeichnung der sich ergebenden Phasenverteilungsfunktion in Form von Grauwerten,
 - c) Umwandlung dieser Grauwertverteilungsfunktion in eine örtlich unterschiedliche Phasenverzögerungen bewirkende Dicken- und/oder Brechungsindex-Verteilungsfunktion, beispielsweise durch Belichten und Bleichen einer lichtempfindlichen Schicht.

2. Verfahren zur Erzeugung eines Phasenobjektes nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch folgende Schritte:
- a) Festlegung der Strahlungsamplituden $T_R(a,b)$ in den einzelnen Punkten der Abbildung,
 - b) Multiplikation der gewünschten Strahlungsamplitude T_R mit einem Zufallsphasenfaktor $\exp [i \phi(a,b)]$
- $$T = T_R \exp [i \phi],$$

c) Berechnung der Fortpflanzung in Rückwärtsrichtung der komplexen Wellenamplitude T von der Bildebene zum besagten Objekt mit Hilfe einer Fresnel-Transformation

$$T * F = |h| \exp [i \phi (x,y)] ,$$

d) Aufzeichnung der Phasenverteilung in Form von Grauwerten,

e) Belichtung einer lichtempfindlichen Emulsion mit der Aufzeichnung,

f) Bleichen der belichteten Emulsion, so daß eine den Grauwerten entsprechende Schrumpfung eintritt.

3. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 2, gekennzeichnet durch eine derartige Führung des Bleichvorganges, daß der Phasenunterschied zwischen auf einen Bereich mit $\phi = 0$ und auf einen Bereich mit $\phi = 2\pi$ fallenden Strahlen gleich einer Wellenlänge ist.
4. Verfahren nach den Ansprüchen 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß die Bemessung der Dickenstruktur und/oder der Brechungsindexverteilung des Phasenobjektes unter Berücksichtigung der Wellenlänge einer im sichtbaren Bereich liegenden kohärenten Strahlung erfolgt.
5. Verfahren nach den Ansprüchen 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß die Bemessung der Dickenstruktur und/oder der Brechungsindexverteilung des Phasenobjektes unter Berücksichtigung der Wellenlänge einer Ultraschallwelle erfolgt.

6. Verfahren nach den Ansprüchen 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß die Bemessung der Dickenstruktur und/oder der Brechungsindexverteilung des Phasenobjektes unter Berücksichtigung der Wellenlänge einer im Mikrowellenbereich liegenden Strahlung erfolgt.
7. Verfahren nach den Ansprüchen 1-6, dadurch gekennzeichnet, daß die Bemessung der Dickenstruktur und/oder der Brechungsindexverteilung des Phasenobjektes für einen einmaligen Durchtritt der Strahlung, d.h. für eine Abbildung mit durchtretender Strahlung erfolgt, bei der sich die Abbildung und die Lichtquelle an gegenüberliegenden Seiten des Phasenobjektes befinden.
8. Verfahren nach den Ansprüchen 1-6, dadurch gekennzeichnet, daß die Bemessung der Dickenstruktur und/oder der Brechungsindexverteilung des Phasenobjektes für einen zweimaligen Durchtritt der Strahlung, d.h. für eine Abbildung mit einer nach dem ersten Durchtritt erfolgenden Reflexion erfolgt, bei der die Abbildung und die Lichtquelle an der gleichen Seite des Phasenobjektes liegen.
9. Verfahren nach den Ansprüchen 1-6, dadurch gekennzeichnet, daß die der Lichtquelle zugewandte Oberfläche des Phasenobjektes reflektierend ausgebildet und unter Berücksichtigung einer an ihr reflektierten Strahlung geformt ist.

10. Verfahren nach den Ansprüchen 1-9, dadurch gekennzeichnet, daß der Zufalls-Phasenfaktor durch eine Vielzahl diskreter punktförmiger Aperturen angenähert wird, von denen jeweils eine Welle ausgeht.
11. Verfahren nach den Ansprüchen 1-10, dadurch gekennzeichnet, daß die punktförmigen Aperturen dreidimensional angeordnet sind und einen Wert von 0 (entsprechend keiner Lichtübertragung) bis 1 (volle Lichtübertragung bzw. offene Apertur) haben können.

7

33

Leerseite

2
36

FIG. 1

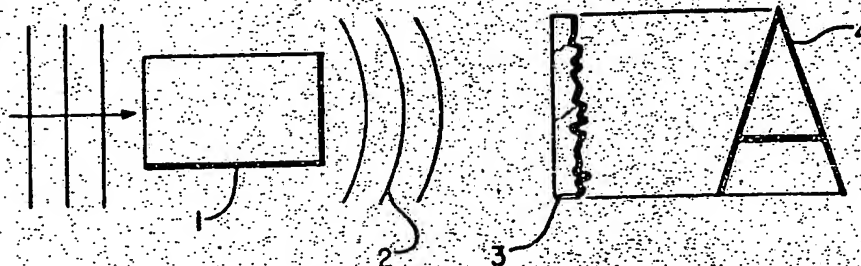


FIG. 2A

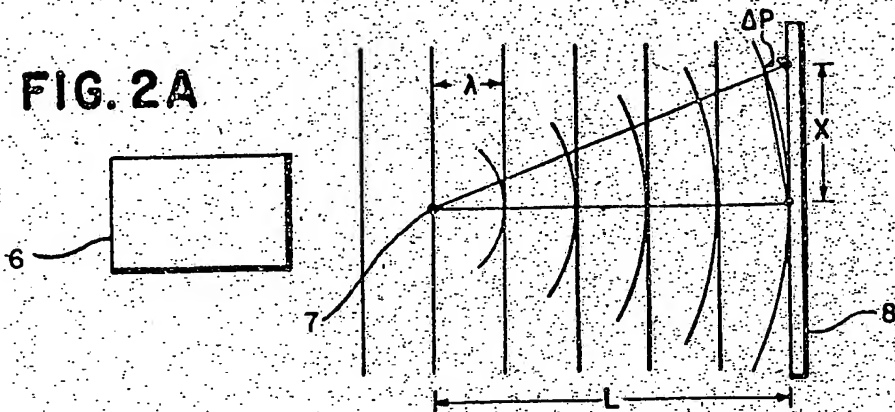


FIG. 2B

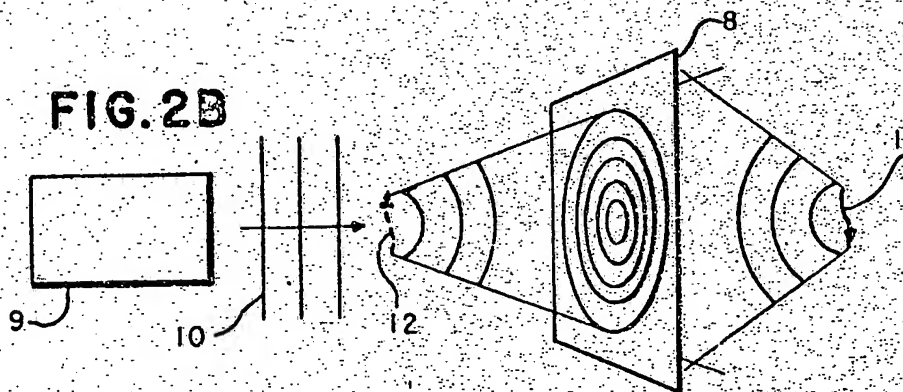
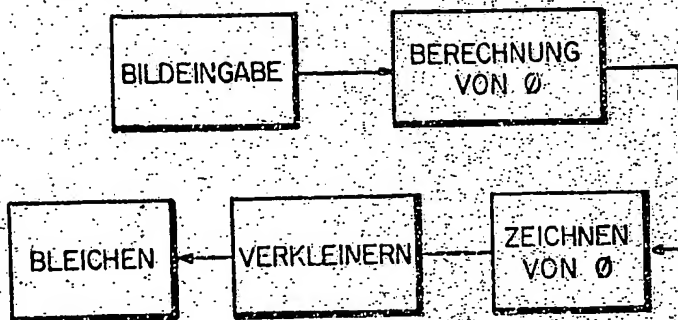


FIG. 7



968004

37

34.

1957475

FIG. 5

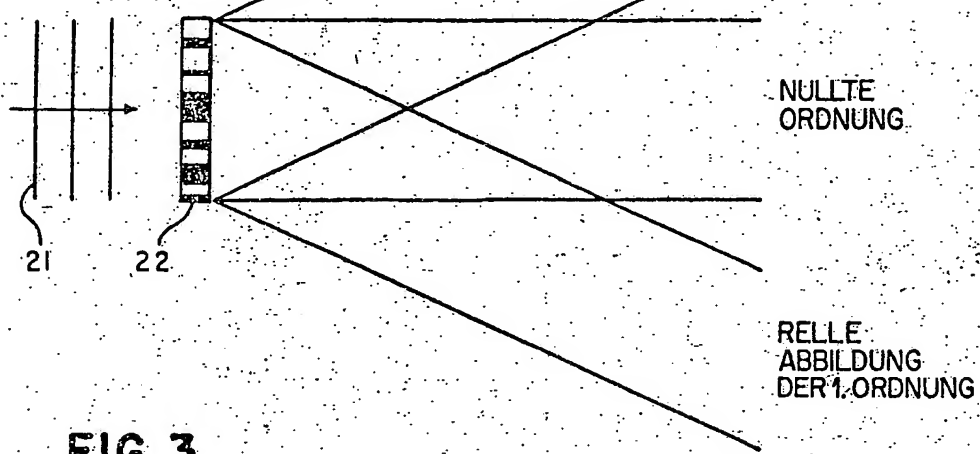


FIG. 3

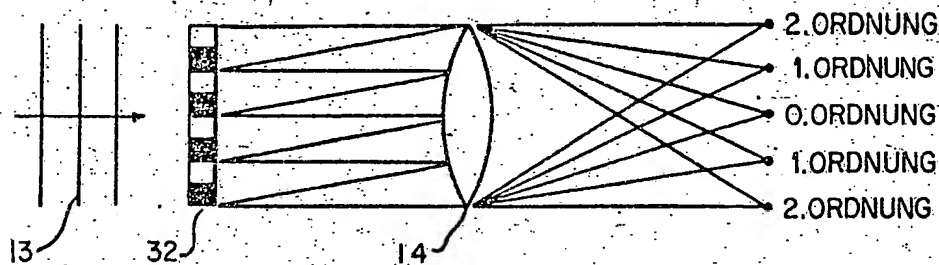


FIG. 4A

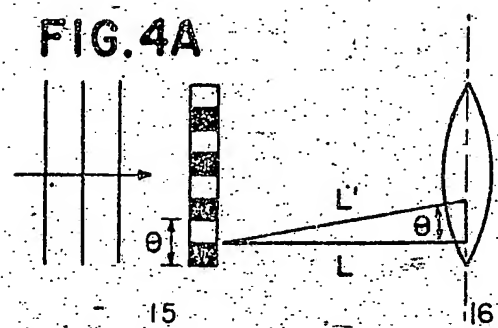


FIG. 4B

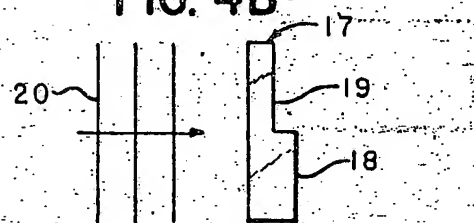
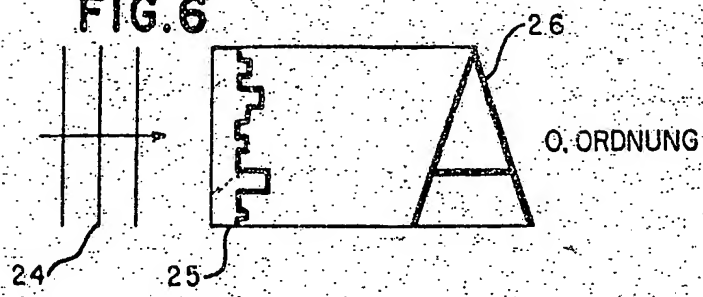


FIG. 6



009824/1419

968001

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.